民勤县公益林植物多样性与土壤因子的关系

赵雪梅[1]， 马维伟[1]， 张世虎[2]， 常文华[1]，
李 广[1]， 赵维军[1]， 张 玉[1]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 民勤县林业和草原局，甘肃 武威 733399）

摘 要： 以民勤县荒漠区生态公益林中五种典型植物群落沙丘芦苇+芨芨草（*Phragmites communis*+*Achnatherum splendens*）、碱蓬+白刺（*Suaeda glauca*+*Nitraria tangutorum*）、霸王+白刺（*Sarcozygium xanthoxylon*+*Nitraria tangutorum*）、珍珠猪毛菜+梭梭（*Salsola passerine*+*Haloxylon ammodendron*）、红砂+梭梭（*Reaumuria songarica*+*Haloxylon ammodendron*）为研究对象，通过野外植物群落调查和土壤采样，研究了植物群落结构、植物物种多样性及其与土壤因子之间的关系，结果表明：(1) 民勤县荒漠区生态公益林植物物种组成相对简单，仅有10科19属22种，红砂+梭梭群落物种组成相对丰富。红砂+梭梭群落Margalef丰富度指数（R）、Simpson优势度指数（D）、Shannon-Wiener多样性指数（H′）为5种植物群落中最大，5种群落Pielou均匀度指数（Jsw）范围为0.55~0.99且五种群落之间无显著差异。(2) 从5种群落土壤理化性质来看，红砂+梭梭群落土壤容重最小、土壤有机碳含量最高。(3) α多样性指数和土壤因子的关系通过冗余分析（Redundancy Analysis，RDA）发现，土壤容重（SBD）、土壤有机碳（SOC）含量对α多样性的解释率较高，分别为56%、14.3%。因此，红砂+梭梭群落的物种丰富度相对较高，土壤理化性质相对较好，能够改善民勤县荒漠区植被生态，对民勤县荒漠区生态公益林植物群落多样性保护和提高具有积极意义。

关键词： 荒漠植物；物种多样性；土壤因子；民勤县

生态公益林是指以长期保持林分健康、维持物种多样性、提高林分质量、保护物种资源、发挥多种生态效益为经营目的的林地，在改善和促进区域生态恢复方面发挥着核心作用[1-2]。生物多样性是生态公益林保护和管理的重要组成部分，对荒漠生态系统的服务功能提升发挥着关键作用[3]。近年来，随着全球气候变化和人类活动干扰加剧，荒漠生态公益林退化已经严重威胁荒漠生态系统植物多样性和动物繁衍，植物多样性下降，是荒漠生态系统面临的最主要生态问题。土壤是植物生长与修复的重要基础，与植物生长和繁殖密切相关，对植物群落的形成和发展具有重要作用[4]。土壤特征影响土壤微生物活性及植物对土壤营养物质的吸收利用[5]，影响着植物群落组成与多样性高低。因此，研究植物物种多样性和土壤之间的相互关系，对生态公益林区植物多样性保护、荒漠生态系统维持和保护具有重要意义。

物种多样性是衡量群落结构的重要指标，影响生态系统稳定性和生产力[6]。荒漠生态系统中植物群落物种多样性与诸多因素相关，包括土壤性质[7-8]、地理环境[9]、气候条件[10]、土壤微生物[11]等。大量研究表明，不同土壤理化性质决定土壤的透气性、水分入渗速率和养分的有效性，从而影响植物生长过程中对水分、空气和养分的利用效率，进而影响植物多样性[12-13]。不同植物群落对土壤理化性质也具有反馈作用，植物根系的生长、植物凋落物的分解、植物分泌物的产生影响土壤微生物的生长和繁殖，进而影响土壤养分的积累，反过来改善植物生长环境，提升植物多样性。植物根系的长短和生理形态决定植物对土壤水分和养分的吸收状况，马雄忠等[14]、鲁延芳等[6]研究发现，灌木群落相较于草本群落，植物根系特征对土壤水分和营养物质吸收具有显著

收稿日期： 2024-09-04； **修订日期：** 2024-11-10
基金项目： 甘肃省2024年度重点人才项目；民勤县林业和草原局项目（GSAU-JSFW-2022-123，GSAU-JSFW-2023-197）；甘肃省财政专项 （GSCZZ 20160909）；甘肃省拔尖领军人才项目（GSBJLJ-2023-09）
作者简介： 赵雪梅（2000-），女，硕士研究生，主要从事干旱区植物多样性研究. E-mail: xwzx@gsau.edu.cn
通讯作者： 马维伟. E-mail: maww@gsau.edu.cn

影响。王園博等[15]研究表明，不同植物的凋落物和根系分泌物决定了土壤中营养物质的输入，对土壤微生物活性产生影响，进而影响土壤养分的积累。因此，进一步探讨荒漠生态公益林植物与土壤之间的关系，对提高区域生物多样性和维护荒漠生态具有重要意义。

甘肃省民勤县属北方防沙带，地处河西走廊东北部、石羊河流域下游，是遏制腾格里和巴丹吉林两大沙漠合拢、保障“丝绸之路经济带”畅通的重要屏障[16]。民勤县荒漠化土地、沙化土地1.404 km^2，占全县国土的88.18%，是我国荒漠化、沙化最严重的地区之一[17]。从20世纪50年代开始，开展了大规模的压沙造林和区域植被自然修复[18]，有力保障了民勤县生态环境的改善及生物多样性保护。目前，学者就石羊河流域荒漠区的植被分布特征、民勤县地区土壤养分特征等方面做了一些工作[19-20]，但是对民勤县生态公益林植物多样性与土壤因子的关系研究未见报道。基于此，本研究在野外实地勘察基础上，在民勤县荒漠生态公益林区设立五种典型植物群落野外调查样地，开展民勤县生态公益林群落结构特征、生物多样性及其与土壤因子之间的关系研究，以期为干旱荒漠区生态公益林区退化林地修复、保护和高质量发展提供参考与理论指导。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区民勤县(38°04′07″~39°27′38″N，101°49′38″~104°11′55″E)位于河西走廊东北部，石羊河流域下游，隶属甘肃省武威市，处于腾格里和巴丹吉林两大沙漠包围之中，三面环沙。其中沙漠、戈壁、剥蚀山地和盐碱滩地面积占90.34%，绿洲边缘风沙线长达408 km。据民勤县第三次全国国土调查显示，民勤现有公益林总面积$1.524×10^5$ hm^2，是民勤绿洲区的重要安全屏障区。该区属于温带大陆性荒漠气候，年平均气温10.3 ℃，极端最高气温40.4 ℃，极端最低气温-20.9 ℃；年均降水量115 mm，降雨通常集中在每年6—9月；年均蒸发量1913 mm。土壤类型主要为灰棕漠土、风沙土、盐土。其中植物主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、珍珠猪毛菜(*Salsola passerine*)、骆驼蒿(*Peganum nigellastrum*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、沙丘芦苇(*Phragmites communis*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)等。

1.2　样方设置与调查

本研究在民勤县森林资源二类调查数据的基础上，结合实地对民勤县林草局管辖的民勤县生态公益林区的多次勘查，综合考虑植被群落的典型性、重要性和代表性，于2023年6—7月在公益林区选取5种典型植物群落，设立样地进行植被调查和土壤样品收集。5种典型植物群落分别为：沙丘芦苇+芨芨草群落、碱蓬+白刺群落、霸王+白刺群落、珍珠猪毛菜+梭梭群落、红砂+梭梭群落。利用便携式手持GPS记录植物群落样地地理坐标、高程，植物群落基本信息见表1。降水量数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)。

在每个典型群落样地中随机布设5块10 m×10 m的灌木样方并在每个灌木样方对角线上设置5块1 m×1 m草本样方，详细记录样方基本信息、灌木和草本的种类、株数、冠幅和盖度等指标。

在每个样方内用五点法采集0~20 cm的土壤样品，每个植物群落土样由各点的剖面土样混合并经过四分法取得，并将土样装入塑封袋中，运回实验室，土样经自然风干、去除杂物、磨碎、过筛后用于测定相关土壤性质。土壤有机碳(SOC)采用油浴加热、重铬酸钾氧化-浓硫酸容量法测定；全氮(TN)采

表1　植物群落基本概况

Tab. 1　Basic overview of plant communities

植物群落	纬度	经度	海拔/m	土壤容重	pH	年降水量/mm	盖度/%
沙丘芦苇+芨芨草	38°12′36.88″N	103°17′48.37″E	1455	1.34	7.46	204.70	25.36
碱蓬+白刺	39°09′33.18″N	103°50′01.85″E	1343	1.66	8.31	158.77	15.80
霸王+白刺	39°26′33.32″N	103°47′13.91″E	1292	1.47	8.06	144.67	32.93
珍珠猪毛菜+梭梭	38°56′10.17″N	102°42′07.61″E	1382	1.05	7.62	147.53	27.98
红砂+梭梭	39°00′22.42″N	103°20′55.67″E	1319	0.30	7.84	163.77	22.96

用硫酸高温消解后用凯氏定氮仪测定；全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定[21]。

1.3 物种多样性计算方法

(1) 重要值[13](Important Value，IV)

重要值=(相对多度+相对频度+相对盖度)/3 (1)

(2) 物种α多样性指数

采用Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数表征[19]。计算公式如下：

$$\text{Margalef丰富度指数：} R = (S-1)\ln N \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener多样性指数：} H' = \sum_{i=1}^{s}(p_i \ln p_i) \quad (3)$$

$$\text{Simpson优势度指数：} D = 1 - \sum_{i=1}^{s}P_i^2 \quad (4)$$

$$\text{Pielou均匀度指数：} Jsw = H'/\ln S \quad (5)$$

式中：S为物种数；N为物种总个体数；P_i为物种i的相对重要值。

1.4 数据分析

在Microsoft Office Excel 2019和SPSS 22.0中对数据进行统计分析，采用PAST03进行物种多样性指数分析；采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)对不同群落特征和多样性指数进行差异性分析(P<0.05)，并在Origin 2022中绘图；采用Canno5对植物群落多样性指数和土壤因子的对应关系进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 植物群落物种组成

民勤县生态公益林五种典型群落的生活型和物种存在明显差别(表2)，本次调查显示5种生态公益林典型群落中共出现22种不同的植物，隶属于11科19属。其中，占比较大的植物科为蒺藜科(4种)、苋科(3种)，分别占总种数的18.18%、13.64%。沙丘芦苇+芨芨草群落与红砂+梭梭群落出现的植物种类最多，均为10种，而红砂+梭梭群落中灌木种类多于沙丘芦苇+芨芨草群落；碱蓬+白刺群落中出现9种植物，珍珠猪毛菜+梭梭群落中出现7种植物，而霸王+白刺群落中植物种数最少，仅存在6种植物。其中白刺具有较为广泛的地理分布，均在五种典型植物群落中出现，红砂与梭梭在五种群落中出现4次，而大白刺(*Nitraria roborowskii*)、黑果枸杞(*L. ruthenicum*)、碱蓬(*S. glauca*)、沙丘芦苇(*P. communis*)、沙蓬(*Agriophyllum pungens*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等植物分布不均，在5种典型群落中各出现1次。从生活型来看，5种典型群落组成形式主要为多年生草本、一年生草本+灌木、灌木、半灌木+小乔木、灌木+小乔木。民勤县荒漠区生态公益林群落结构简单，物种组成少，是典型的荒漠群落类型。

2.2 植物α多样性指数分析

5种植物群落Margalef丰富度指数变化范围为0.26~1.05，且红砂+梭梭群落最高(1.05)，与其他典型植物群落具有显著差异(P<0.05)，沙丘芦苇+芨芨草群落最低(0.26)，但与碱蓬+白刺、霸王+白刺群落间未呈显著差异(P>0.05)(图1)。Shannon-Wiener多样性指数变化范围为0.5~1.25，且红砂+梭梭群落最高(1.25)，与Margalef丰富度指数一样，沙丘芦苇+芨芨草、碱蓬+白刺群落之间差异不显著(P>0.05)。Simpson优势度指数变化范围为0.33~0.64，沙丘芦苇+芨芨草、霸王+白刺、珍珠猪毛菜+梭梭群落之间差异不显著(P>0.05)，碱蓬+梭梭群落Simpson优势度指数最低，5种群落Simpson优势度指数总体偏低，说明植物种间具有一定的竞争关系。Pielou均匀度指数变化范围为0.81~0.96，且5种植物群落间无显著差异(P>0.05)。

2.3 土壤C、N、P含量及化学计量比

如表3所示，5种典型植物群落土壤有机碳在0~20 cm土层中的含量为3.86~15.32 g·kg^{-1}，红砂+梭梭群落土壤有机碳含量最高(15.32 g·kg^{-1})，与霸王+白刺群落之间无显著差异(P>0.05)，且显著高于其他三个群落(P<0.05)，碱蓬+白刺群落土壤SOC含量最低(3.86 g·kg^{-1})但与沙丘芦苇+芨芨草、霸王+白刺群落之间无显著差异(P>0.05)。土壤全氮含量为0.11~0.4 g·kg^{-1}，且碱蓬+白刺群落土壤TN含量显著高于其他植物群落(P<0.05)。土壤TP含量为0.08~0.31 g·kg^{-1}，其中碱蓬+白刺、霸王+白刺、红砂+梭梭群落土壤TP含量相同，为0.31 g·kg^{-1}，珍珠猪毛菜+梭梭群落土壤TP含量显著小于其他植物群落(P<0.05)。5种植物群落土壤C:N、C:P、N:P变化范围分别为9.7~155.37、27.72~57.78、0.35~5.06。

2.4 植物群落多样性与环境因子的关系

对各植物群落的物种多样性指数和9个土壤相关因子指标进行RDA冗余分析(图2)，第1排序轴、

表2 植物群落物种组成和重要值

Tab. 2 Plant community species composition and importance values

植物群落	生活型	植物种	科属	重要值
沙丘芦苇+芨芨草群落	灌木	白刺 *Nitraria tangutorum*	蒺藜科白刺属	0.078
	灌木	红砂 *Reaumuria songarica*	柽柳科红砂属	0.054
	小乔木	柽柳 *Tamarix chinensis*	柽柳科柽柳属	0.091
	小乔木	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	藜科梭梭属	0.086
	半灌木	珍珠猪毛菜 *Salsola passerina*	藜科猪毛菜属	0.147
	多年生草本	大籽蒿 *Artemisia sieversiana*	菊科蒿属	0.053
	多年生草本	黄花补血草 *Limonium aureum*	白花丹科补血属	0.022
	多年生草本	芨芨草 *Achnatherum splendens*	禾本科芨芨草属	0.180
	多年生草本	沙丘芦苇 *Phragmites communis*	禾本科芦苇属	0.238
	多年生草本	骆驼蒿 *Peganum nigellastrum*	白刺科骆驼蒿属	0.050
碱蓬+白刺群落	灌木	白刺 *Nitraria tangutorum*	蒺藜科白刺属	0.261
	灌木	黑沙蒿 *Artemisia ordosica*	菊科蒿属	0.050
	小乔木	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	藜科梭梭属	0.091
	灌木	沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*	豆科沙冬青属	0.029
	半灌木	珍珠猪毛菜 *Salsola passerina*	藜科猪毛菜属	0.103
	多年生草本	蓝刺头 *Echinops davuricus*	菊科蓝刺头属	0.016
	多年生草本	骆驼蒿 *Peganum nigellastrum*	白刺科骆驼蒿属	0.064
	一年生草本	碱蓬 *Suaeda glauca*	苋科碱蓬属	0.314
	一年生草本	雾冰藜 *Grubovia dasyphylla*	苋科雾冰藜属	0.074
霸王 + 白刺群落	灌木	白刺 *Nitraria tangutorum*	蒺藜科白刺属	0.276
	灌木	黑沙蒿 *Artemisia ordosica*	菊科蒿属	0.063
	灌木	红砂 *Reaumuria songarica*	柽柳科红砂属	0.117
	灌木	霸王 *Sarcozygium xanthoxylum*	蒺藜科霸王属	0.423
	多年生草本	蓝刺头 *Echinops davuricus*	菊科蓝刺头属	0.035
	多年生草本	骆驼蒿 *Peganum nigellastrum*	白刺科骆驼蒿属	0.074
珍珠猪毛菜+梭梭群落	灌木	白刺 *Nitraria tangutorum*	蒺藜科白刺属	0.108
	灌木	大白刺 *Nitraria roborowskii*	蒺藜科白刺属	0.104
	灌木	红砂 *Reaumuria songarica*	柽柳科红砂属	0.152
	小乔木	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	藜科梭梭属	0.181
	灌木	小果白刺 *Nitraria sibirica*	蒺藜科白刺属	0.117
	半灌木	珍珠猪毛菜 *Salsola passerina*	藜科猪毛菜属	0.244
	多年生草本	骆驼蒿 *Peganum nigellastrum*	白刺科骆驼蒿属	0.094
红砂+梭梭群落	灌木	白刺 *Nitraria tangutorum*	蒺藜科白刺属	0.099
	灌木	黑果枸杞 *Lycium ruthenicum*	茄科枸杞属	0.021
	灌木	红砂 *Reaumuria songarica*	柽柳科红砂属	0.273
	小乔木	柽柳 *Tamarix chinensis*	柽柳科柽柳属	0.118
	小乔木	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	藜科梭梭属	0.254
	草本或亚灌木	苦豆子 *Sophora alopecuroides*	豆科槐属	0.022
	多年生草本	骆驼蓬 *Peganum harmala*	白刺科骆驼蓬属	0.035
	多年生草本	黄花补血草 *Limonium aureum*	白花丹科补血属	0.069
	一年生草本	沙蓬 *Agriophyllum pungens*	苋科沙蓬属	0.029
	一年生草本	雾冰藜 *Grubovia dasyphylla*	苋科雾冰藜属	0.059

第2排序轴的解释率分别为77.77%和8.52%，即两轴中的总方差解释率为86.29%，可以较好反映群落物种多样性和环境因子的关系。土壤容重(SBD)、酸碱度(pH)与四个α多样性指数(D、R、H′、Jsw)的夹角为钝角，从而呈负相关的关系，土壤有机碳(SOC)与四个α多样性指数(D、R、H′、Jsw)的夹角为

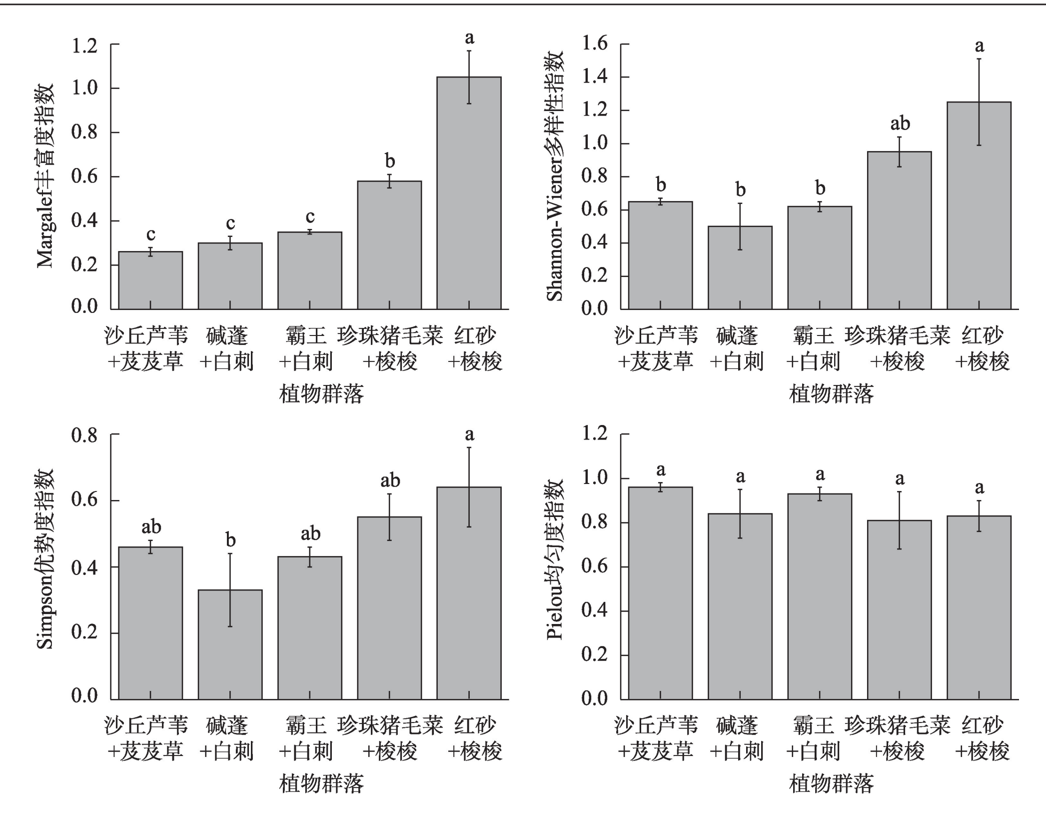


图1 5种典型植物群落物种多样性指数

Fig. 1 Species diversity indices of five typical plant communities

表3 不同植物群落土壤有机碳、全氮、全磷含量及化学计量比

Tab. 3 Soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus contents and stoichiometric ratios in different plant communities

土壤指标	沙丘芦苇+芨芨草群落	碱蓬+白刺群落	霸王+白刺群落	珍珠猪毛菜+梭梭群落	红砂+梭梭群落
SOC/($g\cdot kg^{-1}$)	5.88±1.96c	3.86±1.81c	14.48±1.71ab	8.54±4.19bc	15.32±1.41a
TN/($g\cdot kg^{-1}$)	0.16±0.01b	0.40±0.00a	0.11±0.05b	0.17±0.14b	0.11±0.05b
TP/($g\cdot kg^{-1}$)	0.10±0.00b	0.08±0.00c	0.31±0.00a	0.31±0.00a	0.31±0.00a
C:N	36.40±13.54c	9.70±4.45c	142.04±51.77ab	58.91±22.92bc	155.37±52.85a
C:P	57.78±16.60a	48.88±21.69a	47.01±5.58a	27.72±13.61a	50.04±4.94a
N:P	1.61±0.14b	5.06±0.08a	0.36±0.17c	0.56±0.45c	0.35±0.15c

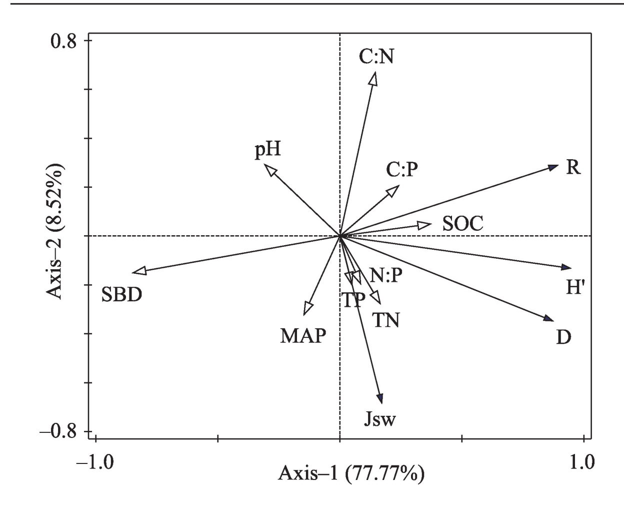
锐角，从而呈正相关的关系。结合影响因子的连线长度及箭头间夹角的余弦值和释变量的解释率来看，土壤容重(SBD)和土壤有机碳(SOC)的解释率分别是56%、14.3%，说明土壤容重(SBD)和土壤有机碳(SOC)是影响四个α多样性指数(D、R、H′、Jsw)的关键因子。

3 讨论

3.1 荒漠区生态公益林物种组成及多样性

民勤县生态公益林植物群落质量普遍不高，这与民勤县的自然气候造成的生态环境脆弱有紧密联系[16]。民勤县处于河西走廊且在腾格里和巴丹吉林两大沙漠包围之中，气候极为干旱，其生态公益林中植物种类稀少且分布不均，群落结构简单。从组成群落结构的植物种来看，沙丘芦苇+芨芨草群落中主要植物种的生活型为多年生草本，碱蓬+白刺群落为一年生草本+灌木，霸王+白刺群落为灌木，珍珠猪毛菜+梭梭群落为半灌木+小乔木，红砂+梭梭群落为灌木+小乔木，总体上只有草本和灌木两类，群落整体结构较为简单。

在α多样性指数中，Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数侧重反映丰富性，Pielou均匀度指数和Simpson优势度指数侧重反映均匀性



注：实心箭头代表α多样性指数，空心箭头代表土壤相关因子；D为Simpson优势度指数，R为Margalef丰富度指数，H′为Shannon-Wiener多样性指数，Jsw为Pielou均匀度指数，MAP为年降水量，pH为酸碱度，SBD为土壤容重，SOC为有机碳，TN为全氮，TP为全磷，C:N为碳氮比，C:P为碳磷比，N:P为氮磷比。

图2 群落物种多样性与土壤相关因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of community species diversity with soil related factors

表4 土壤相关因子解释量和贡献率

Tab. 4 Explained volume and contribution of soil related factors

解释变量	解释率/%	贡献率/%	*F*	*P*
SBD	56.0	64.1	16.5	0.002
SOC	14.3	16.4	6.6	0.012
MAP	5.9	6.7	3.2	0.070
C:N	5.8	6.6	1.8	0.170
N/P	2.6	2.9	1.2	0.290
pH	1.0	1.2	0.5	0.620
TP	0.9	1.0	0.4	0.676
C:P	0.5	0.5	0.2	0.840
TN	0.4	0.5	0.2	0.876

及物种竞争结果方面[13]。本文研究结果表明民勤县生态公益林典型群落物种多样性指数相较于四川省新津区文峰山马尾松生态公益林植物多样性总体偏低[2]（图1），这与李善家等[13]的研究结果一致，说明在极端干旱环境条件下，干旱胁迫导致植物的生长发育受到限制，从而降低了群落物种多样性。本研究中红砂+梭梭群落、珍珠猪毛菜+梭梭群落Margalef丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数显著大于其他植物群落，且红砂+梭梭群落最大，这可能是由于植物生态型和生理学特性影响植物对水分和养分的利用程度，进而影响植物多样性。毛毛等[22]研究表明，梭梭作为干旱地区防风固沙的先锋树种，根系发达，具有耐高温、干旱、风蚀等特点。马雄忠等[14]研究表明珍珠猪毛菜和红砂根系趋向于鱼尾型分支结构，根系水平分布占优、根系发育程度较好，红砂根系分布深度大于珍珠猪毛菜[23]，便于吸收利用较深的土壤水，降低了物种根系内部对水分和养分资源的竞争。由此说明梭梭与红砂的配合使得群落内其他植物物种能够分配更多表层水分及养分，增加了植物群落物种数量。本研究中Simpson优势度指数为碱蓬+白刺群落最低，红砂+梭梭群落最高，这与鲁延芳等[6]对河西走廊中部人工沙漠植被典型群落物种多样性的研究结果相似，说明碱蓬作为浅根系一年生草本植物，需要与梭梭等深根系植物共存，借助深根植物的水分供给来满足自身需求，而碱蓬群落中梭梭占比较小，减少了植物对养分和水分的吸收利用，不利于群落内植物正常生长[24]。民勤县荒漠区生态公益林群落Pielou均匀度指数总体呈波动式无显著变化，这可能与环境因素的影响有关，导致某些物种的数量和生长状况受到正向或负向的影响，从而出现波动影响整个群落的稳定性。

3.2 土壤C、N、P含量及化学计量比

土壤养分是植物生长发育中的必需元素，是反映土壤营养水平的重要指标[7]。土壤有机碳、全氮以及全磷作为土壤肥力和养分的关键组分，在生态系统健康维护中起到重要作用，其含量高低对土壤养分循环和土壤养分积累效率产生影响[8]。本研究中，民勤县荒漠区土壤有机碳、全氮和全磷含量分别为3.86~15.32 g·kg^{-1}、0.11~0.4 g·kg^{-1}、0.08~0.31 g·kg^{-1}（表4），其中全氮和全磷含量低于全国平均水平（1.06 g·kg^{-1}、0.65 g·kg^{-1}）[25]，土壤氮、磷含量贫瘠，且五种植物群落土壤有机碳含量为红砂+梭梭群落最高，这与牧仁[26]、罗雨溪等[27]的研究结果相似，其原因可能是凋落物分解促进了有机碳的积累，并且由于荒漠地区气候干旱、降水量少，导致土壤氮元素流失和磷元素的有效性降低，且不易被植物吸收利用。生态化学计量作为生态系统养分循环研究的重要工具，是碳、氮、磷之间的平衡关系以及生态系统交互影响的理论依据[28]。本研究中C:N为9.7~155.37（表3），除碱蓬+白刺群落外，其他四种植物群落土壤C:N远高于我国土壤C:N均值（12.3）[29]，其原因可能是该地区气候干旱，溶解于土壤水中的氮

素含量减少，导致土壤有机质分解速率降低。土壤C:P作为判断土壤磷矿化能力的重要指标[30]，在本研究中土壤C:P为27.72~57.78，整体低于我国土壤C:P均值（61）[31]，说明该地区土壤磷具有一定的有效性和净矿化能力。土壤N:P是判断土壤氮饱和的重要指标[32]，有学者在陆地生态系统的土壤研究中发现土壤N:P为13[33]，本研究中土壤N:P为0.35~5.06，整体低于13，则进一步说明民勤县荒漠区土壤中氮素缺乏，这与孙雪等[30]的研究结果一致。不同植物群落间土壤化学计量比差异结果显示，红砂+梭梭群落土壤碳氮比高于其他植物群落，5种植物群落之间碳磷比无显著差异，碱蓬+白刺群落氮磷比高于其他群落，这与汤萃文等[11]研究结果相似。民勤县荒漠区土壤贫瘠，地上凋落物和根系分泌物普遍匮乏，导致土壤养分含量普遍较少。而由于生态公益林的建设和5种植物群落的结构组成，使其产生的凋落物和根系分泌物的量不同，进而刺激土壤微生物对土壤养分的转化，导致不同群落间土壤化学计量特征产生差异，因此植物群落结构是影响土壤化学计量特征的主要原因。

3.3 植物群落多样性与土壤因子的关系

土壤因子对植物的生长发育和物种多样性具有重要作用，土壤的质地、养分、酸碱度等决定了植物的生长状况，进而影响植物的物种多样性[8]。现已有大量对干旱荒漠地区土壤特征的研究表明，荒漠地区土壤水分是影响植物生长和荒漠生态系统的主要驱动力，降水量作为影响土壤含水量的直接因素之一，其增加可使土壤含水量提高，改善土壤质地[10]。本研究中，年降水量与多样性指数不具显著相关性，这与何欣月等[34]的研究结果不同，可能是由于降水量短期内影响了土壤含水量，土壤含水量在短时间内的增加促进了植物对水分的吸收并在一定程度上使植物群落内生物量增多，可由于干旱地区极端环境条件的影响和某些植物种对干旱环境的高度适应，导致降水量作为影响土壤水分的因素，并没有对植物物种多样性产生变化。土壤容重影响土壤的紧实度和水分入渗能力，进而影响植物对土壤养分的吸收能力[12]。有大量研究表明，容重过高的土壤增大了土壤紧实度，紧实度过大的土壤容易引起土壤板结，导致土壤通气量降低并增加二氧化碳和氧化亚氮等温室气体的排放[35]；高容重土壤会使土壤降低土壤团聚体的之间的黏结性，使土壤腐殖化程度降低，减少养分循环[36]。并且高容重的土壤机械阻力作用可能会改变根系构造，限制根系向植物地上部分输送水分和养分，从而限制植物叶片的光合作用[37]。本研究结果显示，土壤容重与物种多样性指数呈显著负相关关系，说明土壤容重越小，土壤孔隙度增加，土壤渗透能力越强，从而增加了植物根部的水分供给和呼吸速率，影响土壤与植物的相互作用，促进植物根系生长和微生物活动，进一步增加群落内物种多样性。

本文将土壤中SOC、TN、TP含量以及三者之间的化学计量特征与多样性指数进行冗余分析，得出SOC含量与多样性指数存在显著正相关的关系，这与马骏杰等[38]的研究结果相似，不同的植物群落产生的凋落物和根系分泌物不同，植被通过凋落物和根系向土壤输入有机碳[15]。彭方成等[39]对草本植物与木本植物群落土壤有机碳含量的研究结果表明，木本植物群落的生物量高于草本植物群落，促进了有机碳的积累，减少了养分流失。红砂+梭梭群落中红砂和梭梭为灌木和小乔木，相比芦苇+芨芨草、珍珠猪毛菜+梭梭群落，植物根系更为发达，通过根系产生更多分泌物来促进土壤微生物的产生和活动能力，有机碳输入和积累量增多，影响土壤营养物质的流通和有效性，进而促进其他植物种生长繁殖，群落结构更为复杂和稳定。综上所述，要考虑植物物种协调，以维持群落的稳定性为重点进行民勤县荒漠区生态公益林的建设。

4 结 论

本文基于植物群落调查、土壤因子测定，对植物群落物种α多样性与土壤因子进行了RDA分析，探究民勤县荒漠区生态公益林群落物种多样性与土壤因子的关系。

（1）民勤县荒漠区生态公益林植物物种组成相对简单，群落结构整体为草本和灌木，群落结构简单，红砂+梭梭群落为优势群落。

（2）α多样性指数表明，多样性指数整体偏低，红砂+梭梭群落Margalef丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson优势度指数大于其他四种植物群落。

（3）土壤容重是物种多样性变化的主要因素，其中土壤容重、土壤有机碳含量是影响民勤县荒漠

区生态公益林植物多样性的主要因子。

参考文献(References):

[1] 郑璐, 王世忠, 卢国珍, 等. 生态公益林经营类型划分体系研究概述[J]. 陕西林业科技, 2014(6): 23-27. [Zheng Lu, Wang Shizhong, Lu Guozhen, et al. Research on the management classification system of non-commercial forest[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2014(6): 23-27.]

[2] 孙千惠, 吴霞, 姚小兰, 等. 林分密度对生态公益林群落结构和物种多样性的影响——以新津文峰山马尾松为例[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(3): 315-322. [Sun Qianhui, Wu Xia, Yao Xiaolan, et al. Effects of stand density on community structure and species diversity of ecological non-commercial forest—A case study on *Pinus massoniana* in Wenfeng mountain, Xinjin district, Sichuan Province[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(3): 315-322.]

[3] 杨凯. 基于森林资源二类调查数据的生态公益林健康评价[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023. [Yang Kai. Health Evaluation of Ecological Public Welfare Forest Based on Forest Management Inventory Data[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2023.]

[4] Liu Z, Ma H B, Wang G H, et al. Grazing period management affects the accumulation of plant functional groups, and soil nutrient pools and regulates stoichiometry in the desert steppe of Northwest China[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 368(52): 122213.

[5] Ren C J, Zhang W, Zhong Z K, et al. Differential responses of soil microbial biomass, diversity, and compositions to altitudinal gradients depend on plant and soil characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2009, 142(4): 899-908.

[6] 鲁延芳, 占玉芳, 钱万建, 等. 河西走廊中部人工沙漠植被典型群落物种的多样性[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 14-18. [Lu Yanfang, Zhan Yufang, Qian Wanjian, et al. Species diversity of typical community of artificial desert vegetation in Hexi Corridor[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 14-18.]

[7] Sun J, Wang N, Niu Z. Effect of soil environment on species diversity of desert plant communities[J]. Plants, 2023, 12(19): 3465.

[8] 李亚萍, 蒋进, 宋春武, 等. 莫索湾地区典型沙丘土壤因子与短命植物物种多样性的关系[J]. 干旱区研究, 2018, 35(4): 912-919. [Li Yaping, Jiang Jin, Song Chunwu, et al. Relationship between soil factors and ephemeral plant species diversity on typical sand dunes in the Mosuowan Region[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(4): 912-919.]

[9] Zhang R, Liu T, Zhang J L, et al. Spatial and environmental determinants of plant species diversity in a temperate desert[J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(2): 124-131.

[10] 焦鹏华, 牛健植, 苗禹博, 等. 2001—2020年全球植被对极端气候的响应[J]. 应用生态学报, 2024, 35(11): 1-15. [Jiao Penghua, Niu Jianzhi, Miao Yubo, et al. Global vegetation response to extreme climate from 2001 to 2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(11): 1-15.]

[11] 汤萃文, 王瑛瑛, 李春霖, 等. 民勤荒漠区不同植物群落土壤微生物生物量碳氮及生态化学计量特征[J]. 林业与生态科学, 2024, 39(2): 190-196. [Tang Cuiwen, Wang Yingying, Li Chunlin, et al. Characterization of soil microbial biomass carbon and nitrogen and ecological stoichiometry in different plant communities in Minqin Desert Area[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2024, 39(2): 190-196.]

[12] 李媛媛. 土壤容重对植烟土壤特性和烤烟生长发育的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024. [Li Yuanyuan. Effects of Soil Bulk Density on Soil Characteristics and Growth and Development of Flue-cured Tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.]

[13] 李善家, 王兴敏, 刘海锋, 等. 河西走廊荒漠植物多样性及其对环境因子的响应[J]. 生态环境学报, 2023, 32(3): 429-438. [Li Shanjia, Wang Xingmin, Liu Haifeng, et al. Diversity of desert plants in Hexi Corridor and its response to environmental factors[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(3): 429-438.]

[14] 马雄忠, 王新平. 阿拉善高原2种荒漠植物根系构型及生态适应性特征[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6001-6008. [Ma Xiongzhong, Wang Xinping. Root architecture and adaptive strategy of two desert plants in the Alxa Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(17): 6001-6008.]

[15] 王園博, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 833-844. [Wang Yuanbo, Zhao Ruifeng, Zhang Lihua, et al. Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(5): 833-844.]

[16] 李军豪, 陈勇, 杨国靖, 等. 1975—2018年民勤绿洲沙漠化过程及其驱动机制[J]. 中国沙漠, 2021, 41(3): 44-55. [Li Junhao, Chen Yong, Yang Guojing, et al. The aeolian desertification process and driving mechanism of Minqin Oasis from 1975 to 2018[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(3): 44-55.]

[17] 文侠, 贾筱昕, 董丽杰, 等. 沙区在黄河流域生态保护中的作用探讨——以民勤县为例[J]. 森林防火, 2023, 41(2): 86-90. [Wen Xia, Jia Xiaoxin, Dong Lijie, et al. Discussion on sandy areas in building a solid ecological protection of the Yellow River basin——Taking Minqin County as an example[J]. Journal of Wildland Fire Science, 2023, 41(2): 86-90.]

[18] 戴晟懋, 邱国玉, 赵明. 甘肃民勤绿洲荒漠化防治研究[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 319-324. [Dai Shengmao, Qiu Guoyu, Zhao Ming. Study on land desertification and its prevention and control measures in the Minqin oasis in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 319-324.]

[19] 郭方君, 马全林, 张锦春, 等. 石羊河流域荒漠区植被类型、分布和数量特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(11): 1848-1857. [Guo Fangjun, Ma Quanlin, Zhang Jinchun, et al. Vegetation types, distri-

bution and quantitative characteristics in the desert area of Shiyang River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(11): 1848–1857.]

[20] 柴成武, 王理德, 尉秋实, 等. 民勤青土湖区不同年限退耕地土壤颗粒组成和养分变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 99–104. [Chai Chengwu, Wang Lide, Yu Qiushi, et al. Change characteristics of soil particle composition and nutrient of abandoned farmland in different years in Qingtu Lake Area in Minqin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 99–104.]

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Agrochemical Analysis of Soil[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Publishing House, 2000.]

[22] 毛毛, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 巴丹吉林沙漠东缘天然梭梭种群结构与动态特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 971–978. [Mao Mao, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Population dynamics of natural *Haloxylon ammodendron* in the eastern margin of Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 971–978.]

[23] 单立山, 苏铭, 张正中, 等. 不同生境下荒漠植物红砂-珍珠猪毛菜混生根系的垂直分布规律[J]. 植物生态学报, 2018, 42(4): 475–486. [Shan Lishan, Su Ming, Zhang Zhengzhong, et al. Vertical distribution pattern of mixed root systems of desert plants *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* under different environmental gradients[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42 (4): 475–486.]

[24] 李文静, 吕光辉, 张磊, 等. 干旱区荒漠植物体内潜在水源差异及利用策略分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1557–1566. [Li Wenjing, Lv Guanghui, Zhang Lei, et al. Analysis of potential water source differences and utilization strategies of desert plants in arid regions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28 (8): 1557–1566.]

[25] 依里帆·艾克拜尔江, 李进, 庄伟伟. 两种荒漠豆科植物化学计量特征与生境土壤因子的关系[J]. 西北植物学报, 2022, 42(8): 1384–1395. [Erfan Akberjan, Li Jin, Zhuang Weiwei. Relationship between habitat soil factor and stoichiometric characteristics of two kinds of desert leguminous plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(8): 1384–1395.]

[26] 牧仁, 李新乐, 徐光甫, 等. 乌兰布和沙漠不同生境土壤养分分布[J/OL]. 生态学杂志, [2024–08–21]. 1–12. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240821.1042.005.html. [Mu Ren, Li Xinle, Xu Guangfu, et al. Soil nutrient distributions in different habitats of the Ulanbuh Desert[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, [2024–08–21]. 1–12. http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q. 20240821.1042.005.html.]

[27] 罗雨溪, 孔德兵, 王永欣, 等. 喀斯特槽谷区植被演替对土壤有机碳储量及固碳潜力的影响研究[J]. 绿色科技, 2022, 24(4): 131–135. [Luo Yuxi, Kong Debing, Wang Yongxin, et al. Effects of vegetation succession on soil organic carbon storage and carbon sequestration potential in Karstic Troughs and Valleys[J]. Journal of Green Science and Technology, 2022, 24(4): 131–135.]

[28] 游郭虹, 刘丹, 王艳丽, 等. 高寒草甸植物叶片生态化学计量特征对长期氮肥添加的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(9): 50–62. [You Guohong, Liu Dan, Wang Yanli, et al. Response of plant leaf ecological stoichiometric characteristics to long-term nitrogen addition in alpine meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31 (9): 50–62.]

[29] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(27): 139–151.

[30] 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 等. 河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3353–3363. [Sun Xue, Long Yongli, Liu Le, et al. Soil stoichiometry characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye[J]. Environmental Science, 2023, 44(6): 3353–3363.]

[31] 马雅莉, 高荣, 刘喜东, 等. 白于山区不同植物群落土壤碳氮磷空间分布及化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(9): 116–125. [Ma Yali, Gao Rong, Liu Xidong, et al. Spatial distribution and stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in different plant communities in Baiyu Mountain Areas[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(9): 116–125.]

[32] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 305–314. [Tao Ye, Wu Ganlin, Liu Yaobin, et al. Soil stoichiometry and their influencing factors in typical shrub communities in the Gurbantunggut Desert, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(2): 305–314.]

[33] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: Is there a "redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235–252.

[34] 何欣月, 王宁, 刘均阳, 等. 黄土丘陵区植物群落多样性及生物量随土壤水分梯度变化特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(1): 31–40. [He Xinyue, Wang Ning, Liu Junyang, et al. The variation of plant community diversity and biomass along a soil water gradient in loess hilly region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(1): 31–40.]

[35] Conlin T S S, Driessche R. Response of soil CO_2 and O_2 concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2000, 80(4): 625–632.

[36] 王加旭. 关中农田土壤物理质量退化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [Wang Jiaxu. Soil Physical Quality Degradation Characteristics in the Guanzhong Farmland[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.]

[37] 李湘. 土壤容重对白花泡桐生长的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024. [Li Xiang. Effects of Soil Bulk Density on Paulownia fortunei Growth[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2024.]

[38] 马骏杰, 陈银萍, 牟晓明, 等. 植物多样性对青藏高原东北部高寒草甸土壤有机碳的影响[J]. 高原气象, 2025, 44(1): 56–66.

[Ma Junjie, Chen Yinping, Mou Xiaoming, et al. Effects of plant diversity on soil organic carbon in alpine meadow in northeastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(1): 56-66.]

[39] 彭方成, 汤安民, 边华林, 等. 不同水位梯度和植被类型对洞庭湖湿地土壤有机碳储量的影响[J]. 湿地科学, 2023, 21(6): 868-875. [Peng Fangcheng, Tang Anmin, Bian Hualin, et al. Influences of different water level gradients and vegetation types on soil organic carbon storage in the Dongting Lake Wetland[J]. Wetland Science, 2023, 21(6): 868-875.]

Relationship between plant diversity and soil factors in public welfare forests in Minqin County

ZHAO Xuemei[1], MA Weiwei[1], ZHANG Shihu[2], CHANG Wenhua[1],
LI Guang[1], ZHAO Weijun[1], ZHANG Yu[1]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Minqin County Forestry and Grassland Bureau, Wuwei 733399, Gansu, China)

Abstract: The five typical plant communities in the ecological public welfare forest in the desert area of Minqin County, namely, *Phragmites communis+Achnatherum splendens*, *Suaeda glauca+Nitraria tangutorum*, *Sarcozygium xanthoxylon+Nitraria tangutorum*, *Salsola passerine+Haloxylon ammodendron*, *Reaumuria songarica+Haloxylon ammodendron* as research objects, through the field plant community survey and soil sampling, studied the plant community structure, plant species diversity and its relationship with soil factors, the results show that: (1) Minqin County desert area ecological public welfare forests plant species composition is relatively simple, there are only 10 families, 19 genera and 22 species, and the *Reaumuria songarica+Haloxylon ammodendron* community is relatively rich in species composition. The Margalef richness index (R), Simpson's dominance index(D), and Shannon-Wiener diversity index (H') of the *Reaumuria songarica+Haloxylon ammodendron* community were the largest among the five plant communities, and the Pielou evenness index (Jsw) of the five communities ranged from 0.55 to 0.99 with no significant difference among the five communities. (2) In terms of soil physicochemical properties of the five communities, the *Reaumuria songarica+Haloxylon ammodendron* community had the smallest soil bulk density and the highest soil organic carbon content. (3) The relationship between the α-diversity index and soil factors was found by Redundancy Analysis (RDA) that the soil bulk density (SBD) and soil organic carbon (SOC) content explained a higher percentage of α-diversity, which were 56% and 14.3%, respectively. Therefore, the *Reaumuria songarica+Haloxylon ammodendron* community has relatively high species richness and relatively good soil physicochemical properties, which can improve the vegetation ecology in the desert area of Minqin County, and is of positive significance for the protection and enhancement of plant community diversity in the ecological public welfare forests in the desert area of Minqin County.

Keywords: desert plants; species diversity; soil factors; Minqin County